



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Hochzyklisch beanspruchte Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen. Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

Zachert, Hauke; Wichtmann, Torsten; Kudella, Peter
(2013)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00017373>

License:



CC-BY-NC-ND 3.0 de - Creative Commons, Attribution Non-commercial, No-derivatives

Publication type: Conference or Workshop Item

Division: 13 Department of Civil and Environmental Engineering Sciences

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/17373>

Hochzyklisch beanspruchte Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen

Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

Hauke Zachert, Torsten Wichtmann, Peter Kudella

*Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik,
76131 Karlsruhe, Deutschland, E-mail: Hauke.Zachert@kit.edu, Telefon: +49(0)721/608-42224*

Kurzfassung

Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen sind einer hochzyklischen Belastung aus Wind und Wellen ausgesetzt. Es gibt aber derzeit noch keine abgesicherten oder genormten Prognosemodelle, welche die aus dieser Belastung resultierenden akkumulierten Verformungen im Boden und die sich daraus ergebenden Schiefstellungen der Offshore-Windenergieanlagen beschreiben könnten. Am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF) wird an solchen Modellen zur Prognose der Gebrauchstauglichkeit gearbeitet. Ein auf Laborversuchen basierendes hochzyklisches Akkumulationsmodell wurde entwickelt und es wurden Modellversuche an Flach- und Monopilegründungen durchgeführt. Ergänzt durch numerische Berechnungen sollen diese Untersuchungen die Entwicklung vereinfachter Ingenieurmodelle ermöglichen, welche eine Prognose der Verformungen von Flachgründungen und Monopiles infolge zyklischer Belastung erlauben. Diese Modelle sollen dann ebenso wie die numerischen Berechnungen anhand von Messdaten von In-Situ-Großversuchen validiert werden.

Stichworte

Windenergie, Gründung, Akkumulationsmodell, Zyklisch, Modellversuche, Gebrauchstauglichkeit

1 Einleitung

Der forcierte Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland führt derzeit zu einem starken Wachstum der geplanten und ausgeführten Parks für Windenergieanlagen auf hoher See, also offshore. Die Offshore-Windenergie bietet die Möglichkeit, einen hohen Beitrag zur erneuerbaren Energiegewinnung zu leisten, ohne dabei von den beschränkten Platzverhältnissen an Land ausgebremst zu werden. Außerdem ist offshore ein höherer Windertrag zu erwarten als onshore. Den zahlreichen Vorteilen der Offshore-Windenergie stehen jedoch auch einige Nachteile

gegenüber. So ist die Installation der Anlagen offshore sehr stark wetterabhängig und zur Windbelastung der Anlage kommt noch eine bis zu dreimal höhere Wellenbelastung hinzu.

Die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) ist dadurch einer hochzyklischen Belastung mit ca. 100 Millionen Lastspielen ausgesetzt. Diese führt zu bleibenden Verformungen im Boden, welche sich unter Umständen akkumulieren können. Dann führen sie zu bleibenden Schiefstellungen der Anlage, was die Gebrauchstauglichkeit der OWEA gefährdet. Obwohl die Berücksichtigung der zyklischen Belastung sowohl in nationalen [1] als auch in internationalen (z. B. [2]) Regelwerken gefordert ist, stehen derzeit keine geeigneten Prognosemodelle für die Berechnung der akkumulierten Verformung von Gründungen von OWEA zur Verfügung. Berechnungsvorschriften, die den Einfluss einer zyklischen Belastung auf den Baugrund zutreffend beschreiben können, gibt es für Tiefgründungen (z. B. Monopiles) erst im Ansatz, für Flachgründungen (Schwergewichtsgründungen) noch gar nicht..

2 Beschreibung des Bodenverhaltens mit dem Akkumulationsmodell

Um Verformungsprognosen von Gründungen für OWEA mit Hilfe von Finite Elemente (FE)-Berechnungen durchführen zu können, wird ein selbst entwickeltes Akkumulationsmodell verwendet. Es wurde anhand von zahlreichen zyklischen Laborversuchen validiert und beschreibt das Bodenverhalten auf Elementebene unter der Berücksichtigung von Zustandsänderungen wie z. B. Dichte- oder Spannungsänderungen [3]. Die Beschreibung des Materialverhaltens auf Elementebene hat gegenüber der Systembeschreibung, wie sie in der Regel in einfacheren Modellen vorliegt, den generellen Vorteil, dass beliebige Gründungsvarianten berechnet werden können. Das Vorgehen bei einer solchen Berechnung, bei der das Akkumulationsmodell mit einem konventionellen „impliziten“ Stoffgesetz gekoppelt wird, ist in Bild 1 am Beispiel einer Flachgründung dargestellt. Die impliziten Zyklen werden hier mit der expliziten Berechnung der Dehnungsakkumulation über das Akkumulationsmodell verbunden.

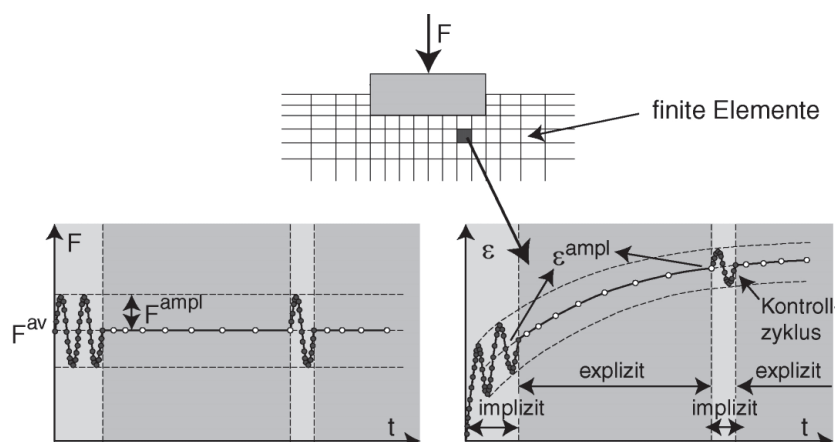


Abb. 1: Ablauf einer FE-Berechnung mit dem Akkumulationsmodell.

Eine rein implizite Berechnung kommt in der Regel aufgrund des immensen Rechenaufwands und der Akkumulation von Fehlern für Berechnungen mit mehr als 50 Zyklen nicht in Frage. In den impliziten Zyklen wird der Verlauf der Dehnung aufgezeichnet und daraus die Dehnungsamplitude ε^{ampl} ermittelt. Diese ist der maßgebende Eingangsparameter für das Akkumulationsmodell:

$$\dot{\varepsilon}^{acc} = f_{ampl} \dot{f}_N f_e f_p f_Y \quad [1]$$

Das Modell beschreibt die inkrementelle Dehnungsakkumulation $\dot{\varepsilon}^{acc}$ in Abhängigkeit von der Dehnungsamplitude (f_{ampl}), der Zyklenzahl (f_N), der Porenzahl (f_e), dem mittleren Druck (f_p) und dem mittleren Spannungsverhältnis (f_Y). Die Funktionen f sind mit Gleichungen hinterlegt, die anhand von zyklischen Triaxialversuchen kalibriert wurden. Das vollständige Modell ist z. B. in [4] dargestellt. Die Weiterentwicklung und Überprüfung des Modells wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) von 2006 bis 2011 in dem Vorhaben „Geotechnische Robustheit und Selbstheilung bei der Gründung von Offshore-Windenergieanlagen“ gefördert. Aktuell (2011-2013) wird im Rahmen des von der DFG unterstützten Vorhabens „Verbesserung eines Akkumulationsmodells für hochzyklische Belastung“ an dem Modell gearbeitet.

3 Modellversuche

Um neben dem zyklischen Verhalten auf Elementebene auch das Systemverhalten von typischen Gründungen für OWEA zu untersuchen, wurden zahlreiche Modellversuche an hochzyklisch belasteten Gründungsstrukturen durchgeführt. Es wurde das Verformungsverhalten von Flachgründungen und Monopiles im Maßstab 1:100 untersucht.

Dabei wurden jeweils verschiedene Lastamplituden F_{ampl} bei verschiedenen Lastmittelwerten F_{av} und bis zu 100000 Zyklen aufgebracht. Außerdem wurde der Einfluss unterschiedlicher Lagerungsdichten des Bodens auf die akkumulierten Verformungen untersucht. In jedem Zyklus wurden dabei die Verschiebungen von Fundament bzw. Monopile mit hoher Genauigkeit ($\approx 0,1\mu m$) aufgezeichnet, um ein vollständiges Bild aller Weggrößen über die gesamte Versuchsdauer zu erhalten. Die Details des Versuchsaufbaus sind in [5] beschrieben. In Bild 2 ist ein Ausschnitt des Versuchsstandes mit dem Flachgründungsmodell abgebildet. Außerdem sind die Setzungen des Flachgründungsmodells bei verschiedenen zyklischen Belastungen dargestellt. Es wird deutlich, dass beispielsweise eine mehrdimensionale Belastung in etwa zu einer Verdopplung der Setzung bei gleicher Zyklenanzahl führt. Ebenso führen hohe Lastamplituden und geringere Lagerungsdichten zu einer Vergrößerung der Setzung. Weitere Ergebnisse der

Untersuchungen an dem Flachgründungsmodell, z. B. mit verschiedenen Zykluspaketen oder dem Verhalten nach einem Extremereignis, sind in [6] zusammengefasst.

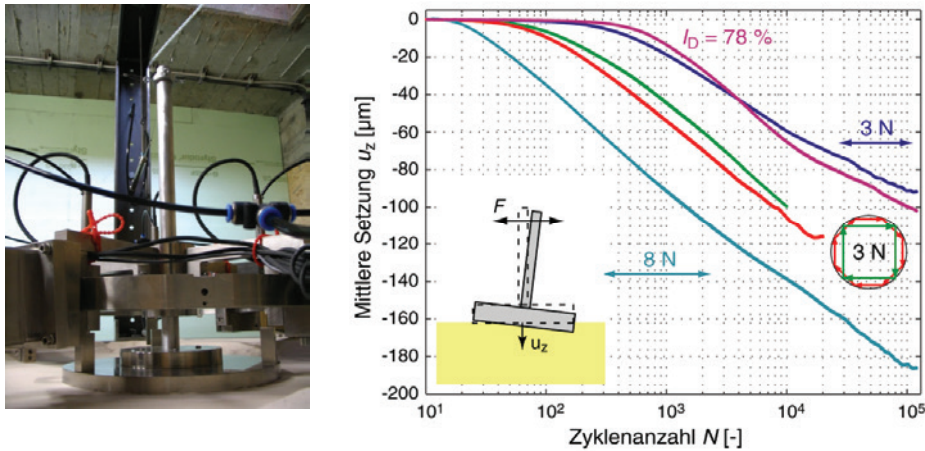


Abb. 2: Foto des Modellfundaments (links) und Setzung des Flachgründungsmodells bei verschiedenen zyklischen Belastungen (rechts).

Bei den Modellversuchen an Monopiles wurden neben den vorgenannten Größen außerdem noch die Einbindetiefe, die Pfahlsteifigkeit und der Pfahldurchmesser variiert. Die Ergebnisse der Versuche sind unter anderem in [7] dargestellt.

Die Versuche an Flachgründungen und an Monopiles liefern wertvolle Informationen über die Abhängigkeiten der akkumulierten Verformungen von der aufgetragenen Belastung und den Bodenverhältnissen. Außerdem bilden sie eine Datenbasis für den Vergleich mit numerischen Berechnungen.

4 FE-Berechnungen und Ansätze für vereinfachte Berechnungsmodelle

Das kommerzielle FE-Programm ABAQUS wurde verwendet, um die Modellversuche numerisch abzubilden. Dabei wurde für die Berechnung der impliziten Zyklen die Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung [8] als Stoffmodell verwendet. Die expliziten Zyklen wurden mit dem oben genannten Akkumulationsmodell beschrieben.

Die numerischen Berechnungen sind in der Lage, Effekte wie die Verdichtung unter dem Fundament oder in der Umgebung des Pfahls infolge der zyklischen Belastung zu beschreiben. Die Berechnung großer Zyklenzahlen stellt dank des Akkumulationsmodells keine Schwierigkeit dar. So kann z. B. für den Monopile gezeigt werden, wie sich der Boden um den Pfahl herum verspannt, wenn der Pfahl mit einer großen horizontalen Einzellast belastet wird, siehe Bild 3, links. Infolge einer anschließenden zyklischen Belastung kommt es insbesondere im

oberflächennahen Bereich wieder zu einer Relaxation der Spannungen im Boden, was zu einer leichten Rückdrehung des Monopiles führt, siehe Bild 3, rechts. Weitere Berechnungen sind in [8] dargestellt.

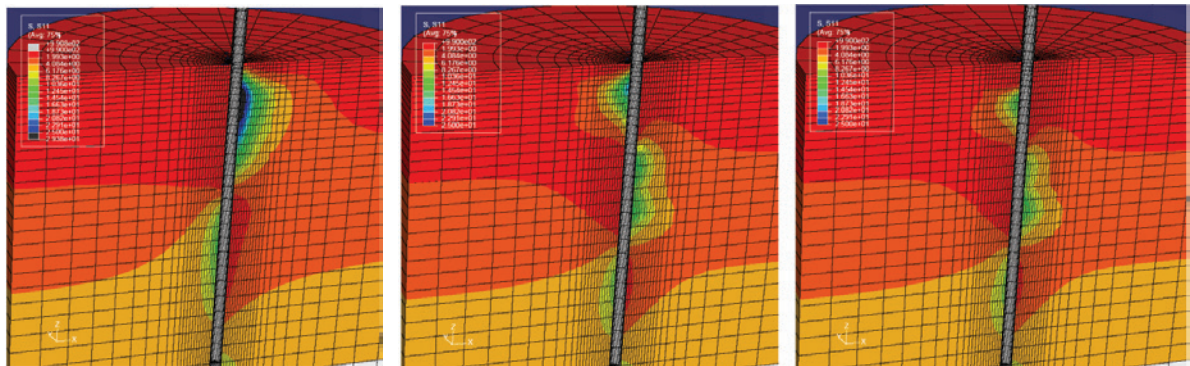


Abb. 3: Horizontale Spannungen im Boden bei einer Maximalbelastung (links), nach der Entlastung (Mitte) und nach einer zyklischen Belastung (rechts).

FE-Berechnungen bieten die Möglichkeit, die gemessenen äußeren Verschiebungen im Modellversuch mit inneren Variablen wie der Dehnungsamplitude, der Porenzahländerung oder der Spannungsverteilung im Boden ins Verhältnis zu setzen. Damit bilden sie die Grundlage für die Entwicklung einfacher Ingenieurmodelle zur Beschreibung des zyklischen Verhaltens von Flachgründungen und Monopiles. Solche Modelle werden derzeit am IBF entwickelt. Für den Monopile kommt ein Federmodell mit beidseitigen Federn in Betracht, um auch die Ver- und Entspannungseffekte simulieren zu können. Für die Flachgründung wird zunächst ein Lamellenmodell untersucht, aber es sind auch Federmodelle denkbar. Allen Modellen ist gemeinsam, dass sie das zyklische Verhalten über das Akkumulationsmodell beschreiben.

5 Validierung der Modelle

Mit dem Ziel, die numerischen Berechnungen und die vereinfachten Modelle zu validieren, werden die Daten eines Großversuchs der Ed. Züblin AG an einer zyklisch belasteten Flachgründung [10] ausgewertet und mit den Prognosen verglichen. Die detaillierte Auswertung der Versuchsdaten und die Erweiterung der Modelle auf ein zertifizierbares Nachweisverfahren für Flachgründungen wird im Rahmen des BMU-Projekts „Validierung eines Nachweisverfahrens für hochzyklisch beanspruchte Flachgründungen von OWEA anhand von Messdaten eines Großversuchs“ (2012-2015) gefördert. Darüber hinaus soll die Ausführung von 10 Schwerkraftfundamenten auf See im BMU-Projekt „Demonstrationsprojekt Albatros I – Technische Begleitforschung – Langzeit-Lagestabilität der Fundamente“ messtechnisch begleitet

werden. Diese Maßnahmen dienen ebenso wie das Engagement im Windenergie Forschungsnetzwerk *WindForS* der nachhaltigen Etablierung von validierten Modellen und Nachweisverfahren für die Berücksichtigung von zyklischen Lasten bei der Bemessung von Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1997-1:2010-10 - Eurocode 7. *Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regel, Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V., 2010.*
- [2] American Petroleum Institute (API). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design, API RP 2A - WSD, Washington DC, USA, 2000.*
- [3] T. Wichtmann und Th. Triantafyllidis. *Prognose der Langzeitverformungen für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen mit einem Akkumulationsmodell, Bautechnik, Vol. 88, Nr. 11, 2011.*
- [4] A. Niemunis, T. Wichtmann and Th. Triantafyllidis. *A high cycle accumulation model for sand, Computers and Geotechnics 32, No. 4, 2005.*
- [5] H. Wienbroer und H. Zachert. *Modellversuche zur Verformungsakkumulation einer zyklisch belasteten Flachgründung, Modellversuche zur Verformungsakkumulation einer zyklisch belasteten Flachgründung. In: Workshop Gründung von Offshore-Windenergieanlagen, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik, KIT, Heft 172, Karlsruhe, 2010.*
- [6] H. Zachert, H. Wienbroer und Th. Triantafyllidis. *Experimentelle Untersuchung der Verformungsakkumulation eines Flachgründungsmodells von Offshore-Windenergieanlagen, Bautechnik, Vol. 88, Nr. 11, 2011.*
- [7] O. Solf. *Modellversuche zur Untersuchung der Selbstheilungseffekte an Monopile-Gründungen, In Workshop – Gründung von Offshore Windenergieanlagen. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Heft 172, 2010.*
- [8] A. Niemunis. *Extended hypoplastic models for soils, In: Triantafyllidis (ed.), Schriftreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 34, 2003.*
- [9] P. Kudella und O. Solf. *Untersuchungen zur Verformungsakkumulation bei zyklisch horizontal beanspruchten Offshore-Monopiles, In: Workshop “Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen”, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 56, 2011.*
- [10] U. Hartwig. *Das Testfundament, Bau und erste Messergebnis, In Workshop – Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft Nr. 56, 2011.*